

ПРИМЕНЕНИЕ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Савин Л.А., Соломин О.В., Пугачев А.О.

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Опоры роторов являются критическими, с точки зрения виброустойчивости, узлами агрегатов топливоподачи и двигателей летательных аппаратов (ДЛА), от которых в значительной мере зависит ресурс и работоспособность всего изделия. Одним из путей развития высокооборотных турбомашин является увеличение рабочих скоростей вращения их роторов, что предопределяет повышенные требования к конструкциям, работоспособности и надежности опорных узлов.

Применение подшипников качения в качестве опор роторов высокоскоростных турбомашин ограничивается показателями долговечности и быстроходности, а также сложностью конструкций подшипникового узла. Практически наиболее целесообразным, а в ряде случаев единственным решением является использование подшипников скольжения с жидкостной или газовой смазкой. К тому же, подшипники скольжения при правильной эксплуатации обладают ресурсом работы, многократно превышающим этот показатель для опор качения.

Одним из перспективных направлений использования подшипников скольжения (ПС) в силовых установках летательных аппаратов являются опоры роторов турбонасосных агрегатов (ТНА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД, рис. 1).

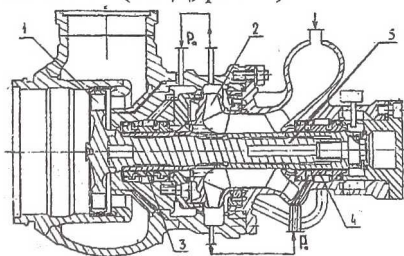


Рис. 1. ТНА ЖРД

Следует отметить, что в настоящее время в США разработаны ракетоносители многоразового запуска, в которых ротора агрегатов топливоподачи установлены на подшипниках скольжения или комбинированных опорах с их использованием. Некоторыми российскими ракетно-космическими

фирмами также ведутся работы в указанном направлении [1]. Наиболее важными проблемами являются обеспечение несущей способности подшипника скольжения и устойчивости роторов в условиях высоких частот вращения, высоких давлений подачи и использования в качестве смазочных материалов криогенных компонент топлива (жидкий водород, жидкий кислород и др.).

Другим направлением применения опор скольжения являются конструкции малоразмерных газотурбинных двигателей (ГТД), в которых в качестве смазочного материала используется воздух (рис. 2).

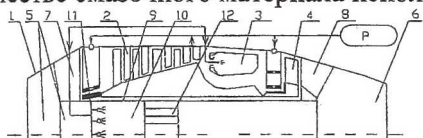


Рис. 2. ГТД

модели для расчета характеристик: грузоподъемности, потерей мощности, расхода смазочного материала, динамических коэффициентов смазочного слоя.

Имеющееся в настоящее время программное обеспечение не позволяет учитывать такие важные факторы, как турбулентность, фазовые переходы, криогенные рабочие тела, сложная геометрия опорных поверхностей, шероховатость, упругие деформации втулки и цапфы.

В связи с вышесказанным назревает острая необходимость в разработке современного программного обеспечения, позволяющего быстро и адекватно выполнять проектировочные, проверочные и оптимизационные расчеты. Для решения отмеченных задач авторами была предложена концепция, построены математические модели и алгоритмы, разработано программное обеспечение по расчету роторно-опорных узлов с подшипниками скольжения.

Рассмотрим три характерных типа подшипников скольжения: гидростатодинамический подшипник (ГСДП); многоклиновый гидродинамический подшипник (МГДП); гибридный подшипник.

Подача под давлением смазочного материала в питающие камеры ГСДП обеспечивает гидростатическую подъемную силу, а за счет достаточно больших свободных опорных поверхностей в ГСДП формируется гидродинамический клин (рис. 3).

Подача смазочного материала в МГДП осуществляется в осевом направлении. В этом случае величина давления подачи непосредственно не влияет на несущую способность подшипника. Щелевой тип дросселирования упрощает конструкцию смазочной системы.

Опорная поверхность гибридного подшипника складывается из многоклиновой части (рис. 4), перемычки и гладкой поверхности, работающей одновременно и как уплотнение.

Грузоподъемность подшипника скольжения W определяется интегрированием поля давлений p по опорной поверхности S

$$W = \iint_S p \vec{n} dS,$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали к S .

Мощностные потери ΔN складываются из двух компонент, обусловленных трением (N_{mp}) и прокачкой (N_{np}) смазочного материала

$$\Delta N = N_{mp} + N_{np} = \frac{\omega D}{4} \iint_S \left(h \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\omega \mu K_x D}{h} \right) dS + p_0 Q,$$

где ω – угловая скорость вала; D – диаметр подшипника; h – функция радиального зазора; x – окружная координата на поверхности подшипника; μ , p_0 – вязкость и давление подачи смазочного материала; K_x – коэффициент турбулентности [2].

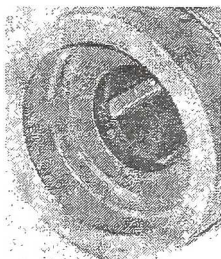


Рис. 3. ГСДП с прямоугольными камерами

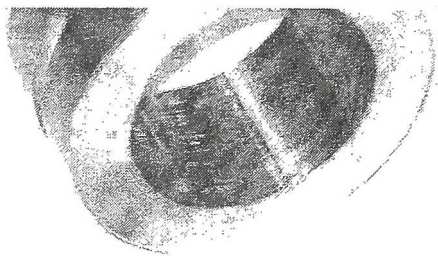


Рис. 4. Многоклиновидная втулка гибридного ПС

Массовый расход смазочного материала:

— ГСДП с точечными питающими камерами

$$Q = \frac{\pi d_H^4}{128 \ell_H} \sum_{i=1}^{nm} \left(\frac{(p_0 - p_H)(\rho_0 + \rho_H)}{K(\mu_0 + \mu_H)} \right)_i,$$

где n , m – количество рядов и число камер в ряду; d_H , ℓ_H – диаметр и длина камеры; индекс «0» – начальное значение; индекс «H» – значение в камере; K – коэффициент, учитывающий влияние турбулентности потока и местных сопротивлений на пропускную способность жиклера с острыми входными кромками

$$K = \left(\frac{Re}{Re^*} \right)^{3/4} + \frac{1,5 Re d_H}{64 \ell_H};$$

Re , Re^* – число Рейнольдса и его критическое значение;

— МГДП

$$Q = \int_0^D \frac{\rho h^3}{12 \mu K_z} \frac{\partial p}{\partial z} dx.$$

Помимо этого, для обеспечения виброустойчивости высокоскоростных турбоагрегатов требуется построение границ устойчивости движения ро-

торов в зависимости от диапазонов изменения рабочих и геометрических параметров роторно-опорных узлов.

Расчет всех указанных характеристик требует знания поля давлений в смазочном слое, что выдвигает высокие требования к построению адекватной математической модели опорных узлов.

Математическая модель течения смазочного материала в зазоре подшипника скольжения, помимо общепринятых допущений в гидродинамической теории смазки, обладает следующими особенностями: гомогенная модель двухфазного течения; модель турбулентности на основе теории Прандтля; модель шероховатости, базирующаяся на модели фрактального броуновского движения.

Важным аспектом является адекватное представление термодинамических и теплофизических свойств смазочных материалов. В данной работе свойства смазочного материала получены аппроксимацией табличных данных в виде аналитических функций от давления и температуры T (табл. 1, I – энтальпия; C_p – теплоемкость; p^* , T^* – критические значения; $p(T)$ – линия насыщения).

В основу расчета полей давлений по опорным поверхностям подшипников положены:

- уравнение Рейнольдса, записанное на случай двумерного турбулентного течения вязкой сжимаемой среды

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3 \rho}{\mu K_x} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3 \rho}{\mu K_z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho U h) - 12 \rho V + 12 h \frac{\partial \rho}{\partial t},$$

где z – осевая координата на поверхности втулки подшипника; U , V – скорость на поверхности цапфы в окружном и радиальном направлениях; t – время;

- уравнение энергий в форме баланса энтальпий (фигурные скобки для двухфазной области)

$$\rho h \left(\frac{\partial I}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + C_p \frac{\partial T}{\partial t} \left\{ r \frac{\partial \chi}{\partial t} \right\} \right) + \rho \left(\frac{U h}{2} - \frac{h^3}{12 \mu K_x} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial x} + C_p \frac{\partial T}{\partial x} \left\{ r \frac{\partial \chi}{\partial x} \right\} \right) - \\ - \frac{\rho h^3}{12 \mu K_z} \frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{\partial I}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial z} + C_p \frac{\partial T}{\partial z} \left\{ r \frac{\partial \chi}{\partial z} \right\} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} h + \frac{U h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U^2}{h} \mu K_x,$$

где r – теплота парообразования, χ – газосодержание;

- уравнение баланса расходов через дроссельное устройство подшипника и контур вокруг питающих камер

$$Q_H = Q_x + Q_z + Q_y.$$

Таблица 1

Свойства некоторых смазочных материалов

Параметр (СИ)	Фаза	
	Жидкая	Газовая
Водород (H ₂), температура 10 – 40 К; $p^* = 1,28 \cdot 10^6$; $T^* = 32,98$		
μ	$10^{-8}(3337,8 - 93,5T)$	$10^{-8}(-37,798 + 7,488T)$
ρ	$2000/(13,43 + 0,763T)$	$0,3 + 8,92 \cdot 10^{-6} p + 4,9 \cdot 10^{-12} p^2$
I	$4026,95 + 13257,9T$	$478710 + 13258T - 0,2232 p$
C_p	$500(-39,4 + 3,049T)$	$500(-37,23 + 3,193T)$
$p = 0,081T^5 - 8,44T^4 + 479,7T^3 - 11911T^2 + 133637T - 564842$		
Кислород (O ₂), температура 90 – 130 К; $p^* = 5,09 \cdot 10^6$; $T^* = 154,77$		
μ	$10^{-7}(4787,9 - 31T)$	$10^{-7}(15,43 + 0,6879T)$
ρ	$1629,96 - 5,387T$	$2,7 + 2,87 \cdot 10^{-5} p + 4,8 \cdot 10^{-12} p^2$
I	$-285862 + 1707,27T$	$-10273 + 1024,8T - 0,018p$
C_p	$1079,77 + 6,698T$	$2186,93 - 7,014T$
$p = 0,0351T^4 - 5,6894T^3 + 255,81T^2 + 628,65T - 182743$		
Фреон-113, температура 243 – 353 К; $p^* = 3,48 \cdot 10^6$; $T^* = 487,25$		
μ	$2,29 \cdot 10^5 + 989T$	$10^5(3,8 + 0,01T - 6,19 \cdot 10^{-7} p)$
ρ	$2376 - 2,683T$	$10^3 p / (4,057p + 0,134 \cdot 10^{-2})$
I	$0,541/T - 1,1936 \cdot 10^{-3}$	$3,52 \cdot 10^{-6} + 2,269 \cdot 10^{-8} T$
C_p	$574 + 1,275T$	$10^3(0,3634 + 9,5532 \cdot 10^{-4} T)$
$p = 10^6(2,0654 \cdot 10^{-7} T^3 - 1,5536 \cdot 10^{-4} T^2 + 3,9324 \cdot 10^{-2} T - 3,3433)$		

Для подшипника, смазываемого жидким водородом, получены зависимости основных характеристик с учетом возможного вскипания и двухфазного состояния криогенного рабочего тела (рис. 5).

Этот рисунок, показывает, что с увеличением температуры подаваемого смазочного материала, сопровождающемся падением вязкости, происходит постепенное снижение несущей способности. Некоторый скачок происходит в начале кипения, когда газосодержание невелико и не превышает 5%. Дальнейшее увеличение газосодержания (рис. 6) вследст-

вие роста температуры приводит к резкому падению несущей способности подшипника. Рост давления подачи не меняет качественно картины этого эффекта, сдвигая, однако, скачок и резкое падение грузоподъемности (зону кипения) в область более высоких температур подачи смазочного материала.

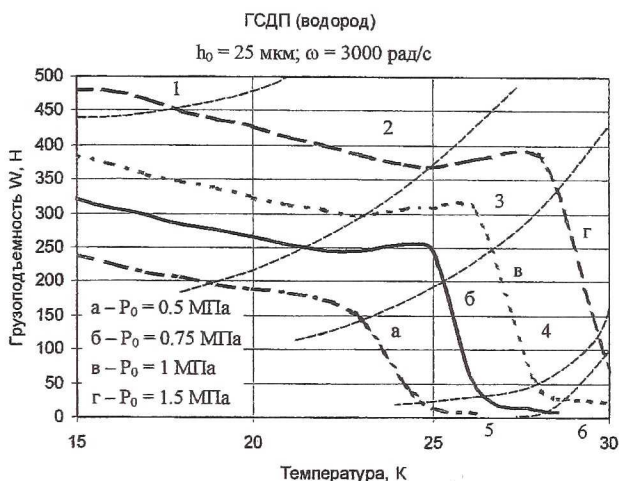


Рис. 5. Грузоподъемность ГСДП при вскипании

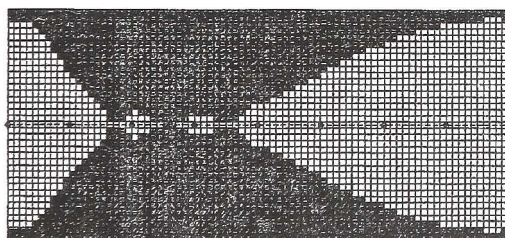


Рис. 6. Картина фазового состояния

Для расчета статических и динамических характеристик высокоскоростных опорных узлов турбоагрегатов разработано и поддерживается программное обеспечение “ROTLAB”, которое является расширением более ранних программных продуктов [3,4] и позволяет рассчитывать, в том числе, бесконтактные уплотнения роторов и демпферы. Программа построена по модульному принципу (расчетные модули и пользовательский интерфейс) с использованием концепции объектно-ориентированного программирования. Расчетный модуль представляет собой набор библиотек динамической компоновки, что позволяет вызывать его функции из других пакетов (например, Matlab).

Полученные результаты (рис.7) позволяют провести проверочный расчет и выбрать рациональные параметры подшипников скольжения. Расчет траекторий движения центра опорной части ротора позволяет провести определение амплитудно-частотных характеристик и провести согласование критериев устойчивости роторной системы с другими показателями работоспособности турбоагрегата.

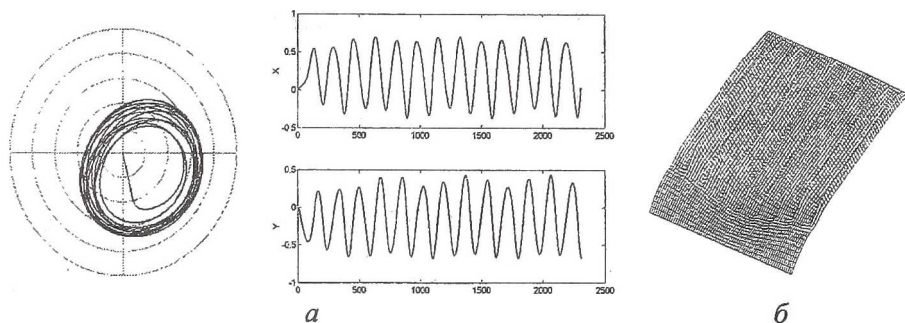


Рис. 7. Расчетные траектория цапфы в ГСДП (а) и поле давлений (б)

Работа частично выполнялась в рамках проекта Министерства образования Российской Федерации, код проекта: 02.01.001.

Список литературы

1. Ромасенко Е.Н., Сидоренко А.С., Толстиков Л.А., Юновидов С.А. Использование гидростатических подшипников в турбонасосных агрегатах // Труды ГДЛ-ОКБ, XVIII, Москва, 2000, С. 216-232.
2. Савин Л.А. Влияние критических течений смазочного материала на характеристики подшипников скольжения // Известия ВУЗов. Машиностроение. №7/9, 1997. – С. 61-66.
3. Программа расчета характеристик подшипников скольжения с криогенной смазкой («Подшипник-Криоген») / Савин Л.А. и др. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610593. 2000 г.
4. Программа расчета основных характеристик высокоскоростных контактных и бесконтактных уплотнений роторов («Уплотнение-Криоген») / Савин Л.А. и др. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002611656. 2002 г.